

Одержані ефективні математичні моделі обчислення і прогнозування розподілу енергопотоків у багаторівневій електротеплоакумулявальній системі обігріву (БЕТСО), що забезпечують задані стандарти теплових параметрів мікроклімату технологічно активної зони виробничих споруд.

УДК 631.2 : 631.171 : 65.011.56

М.А. Романченко, канд.техн.наук
Харківський національний технічний
університет сільського господарства
ім. Петра Василенка, м. Харків

КОНТРОЛЬ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЖИМІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАНДАРТІВ ТЕПЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ВИРОБНИЧИХ СПОРУД З ЕЛЕКТРООБІГРІВНОЮ ПІДЛОГОЮ

Постановка проблеми. Системний аналіз літературних джерел і оцінка сучасного стану наукових досліджень, присвячених вирішенню проблеми щодо розробки енергоефективних електротехнологій та технічних засобів забезпечення стандартів теплових режимів виробничих споруд (ВС) різного функціонального призначення, у тому числі і споруд АПК, переконують в її актуальності та практичному значенні для економіки України [1, 2, 3]. Співставлення результатів огляду наукової та науководослідницької літератури дає можливість не тільки узагальнити техніко-експлуатаційні показники відомих систем забезпечення мікроклімату в ВС, що розташовані в різних природно-кліматичних зонах, але і виявити тенденції створення сучасних систем як у нашій країні [2], так і за її межами (Росія, Німеччина, Канада, США, Фінляндія) [4]. Перш за все йдеться про автоматизовані системи мікроклімату на базі електротеплоакумулявальних установок, які можуть застосовуватись як основні для повного опалення ВС, так і додаткові в складі інших основних систем опалення (водяної, парової, повітряної) [1, 5-7]. Наприклад, різновид електричних кабельних систем опалення [2]. Водночас, зважаючи на досягнуті успіхи, не можна не сказати про те, що ці системи знаходять обмежене застосування в практиці спеціалізованих виробництв (тваринництво, рослинництво закритого ґрунту) із причини відсутності ефективних методів прогнозування, які б дозволи створювати алгоритми аналітичних рішень уніфікованих щодо зміни геометричних і фізичних параметрів об'єкта, умов теплового контакту з навколишнім середовищем, а також технологічних особливостей виробничого процесу.

Мета роботи полягає в розробці методів поліпшення обчислювальної ефективності математичної моделі БЕТСО та можливості використання її в системі автоматичного регулювання (САР) що до дотримування стандартів теплових параметрів підлоги та повітря у технологічно активних зонах (ЗТА) ВС у масштабі реального часу.

Основна частина. Для вирішення проблем прогнозування теплового стану, контролю та регулювання обігріву ЗТА приміщень і об'єктів АПК запропонована система, що забезпечує більш високий якісний рівень дотримування стандартів теплового режиму у ВС, завдячуючи проведенню науковим фундаментальним розробкам щодо створення основ енергозберігаючих багатofункціональних систем із застосуванням багаторівневих електротеплоакумулявальних установок, як обігрівних приладів резисторного типу при живленні їх нагрівачів від традиційних і нетрадиційних поновлювальних джерел енергії [8-12].

Конструкція БЕТСО являє собою паралелепіпед з N-шаровою структурою пасивних і активних (з підводом енергії) шарів розглянута, наприклад, у роботах [9, 10]. Враховуючи прийняті припущення щодо характеру теплообміну на граничних пове-

рхнях, розроблена математична модель теплових процесів у такій структурі, яка зводиться до рішення задачі теплопровідності в системі плоских шарів із дискретним підводом до кожного з трубчастих нагрівників активного шару енергопотоків густиною:

$$p_i(y) = \sum_{j=-(M_i-1)/2}^{(M_i-1)/2} p_{i,j} \cdot f(y - y_{i,j}^c), \quad (1)$$

де $p_{i,j}$ – густина потужності джерел нагрівальних елементів, $Вт/м^3$; $f(y - y_{i,j}^c)$ – функція розподілу теплової потужності в області локалізації трубчастих нагрівачів з координатою центра $y_{i,j}^c$; M_i – кількість трубчастих нагрівачів в i -му шарі. Усього в 3-х активних шарах системи, що розглядається, по висоті паралелепіпеда, починаючи від поверхні підлоги, розташовано відповідно 9, 7 та 5 трубчастих електронагрівників з диференційованими рівнями підвода електроенергії. Таке конструктивне рішення системи обігріву ЗТА ВС виправдане не тільки підвищенням технологічної надійності, але і з позиції досягнення сукупності нових функціональних можливостей (режимів), представлених на рис. 1. З рисунку видно, що запропонована система дозволяє забезпечувати: (а) режим максимального енергозбереження; (б) режим термостабілізації поверхні підлоги; (в) режим акумуляції тепла.



Рис. 1 – Загальна схема функціонування БЕТСО, що дозволяє здійснити різні види режимів опалення

Указані режими можуть бути реалізовані при роботі обігрівної системи за допомогою САР, яка в масштабі реального часу, використовуючи оперативну інформацію датчиків, визначає кількість електроенергії, яку необхідно підвести до електронагрівників того чи іншого ярусу БЕТСО. Такі режими структурно-функціонального регулювання представлені в табл. 1. У цій таблиці P_{10} – потужність джерел енергії

(питома потужність, Вт/м²), що підводиться до нагрівальних елементів 1-го активного шару від поверхні підлоги (ярусу) і забезпечує на її поверхні задану нормативну температуру $t_n = t_n^H$. Потужності джерел енергії, що підводяться до елементів 2-го й 3-го ярусів також можуть в автономному або комбінованому режимі забезпечувати на поверхні підлоги заданий рівень температур t_n^H , позначаються відповідно P_{20} (Вт/м²) і P_{30} (Вт/м²). k_j , $j=1,2,3$ – числові значення, які визначаються геометричними параметрами БЕТСО і теплофізичними характеристиками її складових.

У режимах I, III, V активними є тільки яруси 1-й, 2-й або 3-й відповідно, а в режимах II й V електроенергія підводиться одночасно в 1-й і 2-й або 2-й і 3-й яруси відповідно. Обчислення моделі БЕТСО дозволяє знайти всі необхідні параметри та побудувати САР, яка буде в автоматичному режимі керувати розподілом енергопотоків у системі так, щоб забезпечувати на поверхні підлоги заданий рівень температури – тобто виконувати структурно-функціональне керування обігрівом ЗТА. При розв’язанні такої зворотної задачі теплопровідності складнощів при обчисленні не виникає, тому в даному випадку обрана одновимірною багат шарова модель, і співвідношення для визначення розподілу потужностей по ярусах мають вигляд системи лінійних рівнянь.

Таблиця 1 – Режими структурно-функціонального керування вхідними енергопотоків БЕТСО

Режим	Співвідношення потужностей енергоресурсу й граничних потужностей БЕТСО	Розподіл енергопотоків по ярусах БЕТСО
I	$P = P_{10}$	$P = \{P_{10}, 0, 0\}$
II	$P_{10} < P < P_{20}$	$P = \{k_1 P_{11}, k_2 P_{12}, 0\}$
III	$P = P_{20}$	$P = \{0, P_{20}, 0\}$
IV	$P_{20} < P < P_{30}$	$P = \{0, k_2 P_{22}, k_3 P_{23}\}$
V	$P = P_{30}$	$P = \{0, 0, P_{30}\}$
VI	$P > P_{30}$	$P = \{0, 0, P_{30}\}$

Проблема вирівнювання температури підлоги (тобто термостабілізації), обмеженої шириною обігрівної смуги ЗТА, потребує рішення двовимірної граничної задачі теплопровідності з урахуванням теплових потоків через бічні стінки БЕТСО. Це було зроблено в попередніх роботах, де показано на конкретних структурах розподіл енергії вхідних потоків по грюючих трубчастих нагрівниках у межах ярусу з допомогою САР. У роботі [12] при побудові такого роду САР запропонована концептуальна модель автоматичної системи обігріву ЗТА, у якій утримуються тварини, яка виконана на основі БЕТСО. В основу системи покладена строга математична модель процесу теплопередачі в БЕТСО, яка побудована з можливістю врахування реальних технологічних умов у ЗТА, можливістю перерозподілу енергопотоків до різних груп внутрішніх нагрівачів з метою вирівнювання температури на поверхні підлоги та врахуванням можливої акумуляції тепла в масиві системи. Модель, що розглядається, має порівняно високу ступінь складності, оскільки описує процеси теплопередачі у багат шаровому середовищі з досить великою кількістю розподілених у її масиві лінійних трубчастих нагрівачів, і, фактично, реалізує алгоритм рішення зворотної задачі теплопровідності. Виникає необхідність підвищення її обчислювальної ефективності як елемента САР.

Крім того, при розробці системи автоматичного регулювання виникає проблема оперативного прогнозування рівня споживання енергоресурсів для забезпечення заданих стандартів теплових режимів ЗТА, коли змінюються зовнішні й внутрішні теплові умови. Одержана математична модель є порівняно складною для випадку її безпосереднього використання в інженерній практиці (потребує потужних обчислювальних засобів), але вона є основою для побудови адекватних обчислювальних моделей БЕТСО за допомогою інтерполяції її характеристик (наприклад, температурних або потужнісних), які повністю відповідають рівню точності вихідної задачі.

Наприклад, на рис. 2а і 2б наведені залежності сумарної потужності енергопотоків БЕТСО (погонна потужність обігрівної смуги, Вт/м) в режимі **I**, **III** і **V** від двох параметрів – інтенсивності теплообміну на поверхні підлоги ($7.5 \text{ J a J } 15$) і через бічні стінки ($0 \text{ J a } 2.25$), які в оптимізованому режимі забезпечують термостабілізацію поверхні підлоги на рівнях відповідно $t_{n1} = 18^\circ \text{C}$ і 38°C .

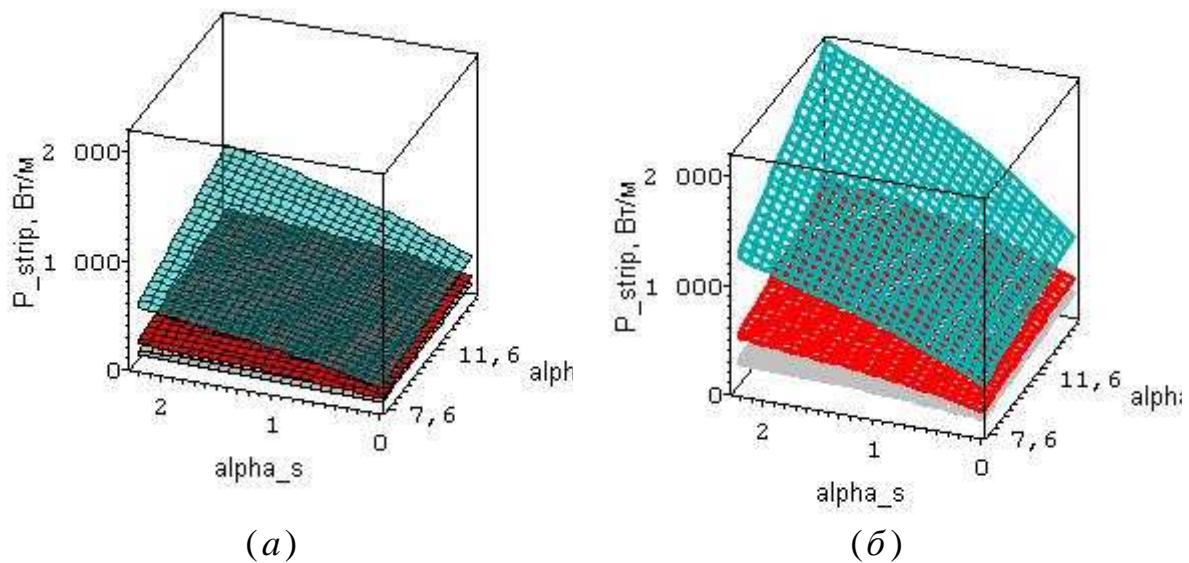


Рис. 2 – Карти-поверхні прогнозованої погонної потужності БЕТСО для режимів **I**, **III** і **V** при термостабілізації температури поверхні підлоги на рівнях нагріву $t_{n1} = (a) 18^\circ \text{C}$ і $(б) 38^\circ \text{C}$ при зміні параметрів теплообміну a і a_s

У табл. 2 наведені відповідні інтерполяційні поліноми 3-ї степені як функції a і a_s щодо відповідних погонних потужностей для режимів **I**, **III** і **V**. Одержані аналітичні вирази дозволяють з допомогою мікропроцесорних засобів САР оперативно прогнозувати величину необхідної потужності, яку треба залучити при зміні умов теплообміну для забезпечення заданого рівня температури поверхні підлоги. Набір таких даних стосовно конкретної системи обігріву для приміщення заданого функціонального призначення являє собою базу даних, яка може бути покладена в основу спеціалізованої енергоощадної (з залученням як традиційних джерел енергії так і НПДЕ) системи управління мікрокліматом для забезпечення заданих умов утримання тварин при певних внутрішніх і зовнішніх параметрах навколишнього середовища, що змінюються.

Таблиця 2 – Інтерполяційні поліноми щодо обчислення погонної потужності виділення енергії в ярусах 1-му, 2-му або 3-му для температур поверхні $t_{n1} = (a) 18^\circ \text{C}$ і $(б) 38^\circ \text{C}$ в залежності від величин a і a_s *

(a)

$$\begin{aligned}
 P_{18}(a, a_0) = & 18.99 + 5.198 \chi_0 - 0.9509 \chi_0^2 + 0.1149 \chi_0^3 + \\
 & + 6.381 \chi + 7.313 \chi \chi_0 - 3.121 \chi \chi_0^2 + 0.5419 \chi \chi_0^3 - \\
 & - 0.002 \chi^2 - 0.0044 \chi^2 \chi_0 + 0.0002 \chi^2 \chi_0^2 + 0.0001 \chi^2 \chi_0^3 - \\
 P_{18}(a, a_0) = & 28.86 + 10.14 \chi_0 + 0.4086 \chi_0^2 - 0.1023 \chi_0^3 + \\
 & + 9.792 \chi + 12.45 \chi \chi_0 - 4.261 \chi \chi_0^2 + 0.7168 \chi \chi_0^3 - \\
 & - 0.0001 \chi^2 + 0.0006 \chi^2 \chi_0 - 0.0038 \chi^2 \chi_0^2 + 0.0011 \chi^2 \chi_0^3 - \\
 P_{18}(a, a_0) = & 58.91 + 24.68 \chi_0 + 3.831 \chi_0^2 - 0.6705 \chi_0^3 + \\
 & + 19.94 \chi + 27.40 \chi \chi_0 - 7.231 \chi \chi_0^2 + 1.231 \chi \chi_0^3 - \\
 & - 0.0013 \chi^2 - 0.0041 \chi^2 \chi_0 - 0.0047 \chi^2 \chi_0^2 + 0.0005 \chi^2 \chi_0^3
 \end{aligned}$$

(б)

$$\begin{aligned}
 P_{38}(a, a_0) = & 46.62 - 0.8825 \chi_0 + 13.67 \chi_0^2 - 4.239 \chi_0^3 + \\
 & + 14.48 \chi + 19.46 \chi \chi_0 - 11.39 \chi \chi_0^2 + 2.483 \chi \chi_0^3 - \\
 & - 0.1212 \chi^2 - 0.3613 \chi^2 \chi_0 + 0.4402 \chi^2 \chi_0^2 - 0.1221 \chi^2 \chi_0^3 - \\
 P_{38}(a, a_0) = & 79.01 + 25.86 \chi_0 - 1.390 \chi_0^2 + 0.3609 \chi_0^3 + \\
 & + 20.03 \chi + 26.24 \chi \chi_0 - 8.591 \chi \chi_0^2 + 1.388 \chi \chi_0^3 + \\
 & + 0.0124 \chi^2 + 0.0427 \chi^2 \chi_0 - 0.061 \chi^2 \chi_0^2 + 0.0165 \chi^2 \chi_0^3 - \\
 P_{38}(a, a_0) = & 160.5 + 57.69 \chi_0 + 9.567 \chi_0^2 - 1.502 \chi_0^3 + \\
 & + 40.94 \chi + 59.26 \chi \chi_0 - 15.73 \chi \chi_0^2 + 2.581 \chi \chi_0^3 + \\
 & + 0.0119 \chi^2 - 0.0609 \chi^2 \chi_0 - 0.0147 \chi^2 \chi_0^2 + 0.014 \chi^2 \chi_0^3
 \end{aligned}$$

* В таблиці параметр a_s замінено на a_0

Висновки. 1. Запропонований теоретико-експериментальний підхід дає можливість на основі розв'язання зворотних задач теплопровідності для БЕТСО, при використанні обмеженої кількості термодатчиків, реалізувати раціональний розподіл енергопотоків між трубчастими нагрівальними елементами, що дозволяє забезпечити стандарти теплового режиму в ЗТА утримання тварин при одночасному збереженні енергоресурсів.

2. Отримано аналітичні структури рішення зворотних задач теплопровідності для електротеплоаккумулятивних систем обігріву, що містять як параметри такі складові: потужності енергопотоків, що підводяться до нагрівальних елементів системи обігріву; стандарти рівня нагріву поверхні підлоги, а також теплофізичні та геометричні параметри БЕТСО.

3. Комп'ютерне моделювання дозволяє проводити порівняно «тонку» корекцію конструкції БЕТСО та режимів енергопідводу ще на стадії її проектування, що дозволяє знайти принципові технічні рішення щодо раціонального обігріву ЗТА.

Література

1. Мартыненко И.И., Гирнык Н.Л., Полищук В.М. Автоматизация управления температурно-влажностными режимами сельскохозяйственных объектов / М.: Колос, 1984. – 151 с.
2. Электротеплоаккумуляционное отопление греющим полом / Под ред. Д.И. Розинского. – К.: ИТТ НАНУ, НПП «ЭЛЕТЕР», 2001. – 156 с.
3. Маляренко В.А., Редько А.Ф., Чайка Ю.И., Поволочко В.Б. Техническая теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений / Харьков: Рубикон, 2001. – 280 с.
4. Свистунов В.М., Пушняков Н.К. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов АПК и ЖКХ / СПб.: Политехн., 2006. – 423 с.
5. Растринин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами / М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.
6. Табунщиков Ю. К., Бродач М. М. Энергоэффективные здания // М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 193 с.
7. Советов Б. Я. Моделирование систем / М.: Высш. шк., 2005. – 343 с.
8. Устройство для электрообогреваемого пола животноводческого помещения. А. с. 1813381 СССР, МКИ А01К15/01 / Н. А. Романченко, В. И. Мельник, А. А. Румянцев, В. Я. Курышев. Оpubл. 07.05.93, Бюл. №17. – 3 с.

9. Романченко М.А. Ідентифікація теплових джерел енергії в системах обігріву підлог виробничих приміщень і споруд АПК // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2003. – №4(5). – С. 58-65.
10. Романченко Н.А. Діагностика і прогнозування температурного режиму повітряного середовища виробничих споруд АПК з електрообігрівними підлогами / Вісник ХДТУСГ «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Вип. 37. – Т. 2, Харків, 2005. – С. 245-257.
11. Романченко М. А. Структурно-функціональне керування вхідними енергопотокami багаторівневої електротеплоаккумуляційної системи обігріву підлог і повітря в спорудах АПК // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2006. – №1. – С. 31-41.
12. Романченко М. А. Особливості керування системами мікроклімату з застосуванням багаторівневих електротеплоаккумуляційних установок// Вісн. Харківськ. нац. техн. ун.-ту с. г. ім. П. Василенка. – Вип. 57 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Т. 2. – Харків: ХНТУСГ, 2007. – Стор. 220-227.

**КОНТРОЛЬ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
СТАНДАРТОВ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ
С ЕЛЕКТРООБОГРЕВАЮЩИМ ПОЛОМ**

М. А. Романченко

Получены эффективные математические модели вычисления и прогнозирования распределения энергопотоков в многоуровневой электротеплоаккумуляционной системе обогрева, которые обеспечивают заданные стандарты тепловых режимов микроклимата технологически активной зоны производственного помещения.

**THE CONTROL AND FORECASTING OF
MAINTENANCE MODES OF THE STANDARDS OF THERMAL PARAMETERS OF
INDUSTRIAL STRUCTURES MICROCLIMATE
WITH ELECTRICAL-WARMED FLOOR**

M.A. Romantchenko

The effective mathematical models of calculation and forecasting of distribution of energy flows in multilevel electroheating and accumulating heating system are received which provide the given thermal standards of a technologically active zone of a cattle-breeding premise.